



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

## NÁVRH A REALIZACE OPLÁŠTĚNÍ VODOTĚSNÉ BEZDRÁTOVÉ INERCIÁLNÍ JEDNOTKY

WATERPROOF WIRELESS IMU COVER DESIGN

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Kračmar

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.

BRNO 2016

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Student: **Filip Kračmar**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.**  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Návrh a realizace opláštění vodotěsné bezdrátové inerciální jednotky

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci spolupráce s CESA VUT je řešena úloha analýzy pohybu závodních plavců. Původní měření průběhu rychlosti plavce pomocí IRC snímačů na bubnu vlečeného lanka by mělo být nahrazeno jednotkou IMU, která nahrává data z akcelerometru a gyroskopu a následně je bezdrátově předává ke zpracování. K této inerciální jednotce je třeba navrhnout a realizovat opláštění, které ponese snímací elektroniku, umožní přístup k měřeným datům, atd.

### Cíle bakalářské práce:

1. Navrhněte vodotěsné opláštění inerciální jednotky, s přihlédnutím k následujícím požadavkům.
2. Hydrodynamický tvar zaručující nízký odpor při plavání.
3. Jednoduchý způsob upevnění na plavce.
4. Snadný přístup k vnitřní elektronice
5. Přístupné nabíjecí konektory

### Seznam literatury:

G. Dieter: Engineering Design, McGraw-Hill Education; 5 edition, 2012

R. Budynas: Shingleys Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill Education; 10 edition, 2014

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací opláštění vodotěsné bezdrátové inerciální jednotky určené pro měření dat během plaveckého tréninku. Byl vytvořen model opláštění v 3D CAD softwaru. Inerciální měřicí jednotka je upevněna v oblasti beder pomocí pásu. Je zaručen snadný přístup k elektronice a nabíjecím konektorům. Tvar odpovídá hydrodynamickým požadavkům. Výroba byla provedena metodou 3D tisku. Po montáži a úpravách povrchu bylo opláštění testováno na vodotěsnost a následně využito pro měření tréninku plavců.

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the design and realization of waterproof wireless inertial measurement units cover to measure data of swimming training. The model of casing was created in 3D CAD software. IMU is fixed to lower back by using belt. Easy access to electronics and charging connectors are guaranteed. The shape corresponds to hydrodynamic requirements. Manufacture was made by 3D printing. Casing was tested of waterproof and used for measurement of swimming training.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Inerciální měřicí jednotka, plavání, vodotěsný obal, 3D tisk

## **KEYWORDS**

Inertial measurement unit, swimming, waterproof cover, 3D printing

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KRAČMAR, F. Návrh a realizace opláštění vodotěsné bezdrátové inerciální jednotky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 33 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D..

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci „Návrh a realizace opláštění vodotěsné bezdrátové inerciální jednotky“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Krejsy, Ph.D. a uvedl jsem v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 16. května 2016

.....  
Filip Kračmar

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval vedoucímu panu doc. Ing. Jiřímu Krejsovi, Ph.D. za odborné vedení a poskytování cenných rad při vypracování této bakalářské práce. Děkuji také panu Ing. Tomáši Ripelovi za podnětné připomínky a pomoc při tvorbě modelu opláštění.

# OBSAH

1	ÚVOD .....	9
2	TEORETICKÁ ČÁST.....	10
2.1	ROZBOR PLAVBY .....	10
2.1.1	Plavecký styl .....	10
2.1.2	Startovní skok, obrátka.....	11
2.2	MĚŘENÍ POHYBU ZÁVODNÍHO PLAVCE .....	13
2.3	VODOTĚSNÉ KRABICE.....	14
2.4	SHRNUTÍ.....	14
3	FORMULACE PROBLÉMU A CÍLŮ .....	15
4	KONSTRUKČNÍ NÁVRH .....	16
4.1	ELEKTRONIKA .....	16
4.2	KONSTRUKČNÍ UZLY .....	17
4.2.1	Tvar .....	17
4.2.2	Uchycení.....	18
4.2.3	Nabíjení .....	20
4.2.4	Rozebíratelnost.....	21
4.2.5	Těsnění .....	22
4.2.6	Zapínání / vypínání.....	23
4.3	NAPĚŤOVÁ A DEFORMAČNÍ ANALÝZA .....	24
5	VÝROBA A MONTÁŽ .....	26
6	OVĚŘENÍ .....	27
7	ZÁVĚR.....	29
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	30
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	32
10	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	33
11	SEZNAM TABULEK.....	33



# 1 ÚVOD

V každém sportu je snaha podávat nejlepší výkony a plavání není výjimkou. V dnešní době vyrovnaných výkonů mezi sportovci o vítězi často rozhodují maličkosti. Technologie a vědecký přístup dokáží tyto výkony přivést až na hranici možností. V letech 2008 až 2009 se mužský světový rekord v plavání volným stylem na 50 m přepisoval 6x a přitom se světový rekord posunul o pouhých 0,65 vteřin. Velkou roli ve zdolávání světového rekordu měla tehdy nová technologie výroby plavek. Ta spočívala ve speciálních vodovzdorných vláknech, které způsobovaly hydrostatický vztlak a napomáhaly tak polohování těla při plavání. Vlastnosti závodních plavek, například střih a materiál, byly plaveckými organizacemi v roce 2010 přísně omezeny. [1] Tato kauza ukazuje nemalý dopad vědy a výzkumu na sportovní výkony. Každá inovace přinášející i minimální zlepšení je tedy pro sportovce důležitá.

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací opláštění vodotěsné bezdrátové inerciální jednotky. V rámci spolupráce s Centrem sportovních aktivit VUT má tato jednotka sloužit jako nový způsob měření a analýzy pohybu závodních plavců. Doposud bylo měření prováděno pomocí zařízení zvaného tachograf, skládající se z IRC snímačů na bubnu vlečeného lanka. Tato metoda má být nahrazena inerciální měřicí jednotkou nahrávající data z akcelerometru a gyroskopu, která následně bezdrátově předává data ke zpracování. Tyto informace o kolísání rychlosti mohou být pro plavce a jejich trenéry důležité a vést ke zlepšení sportovního výkonu na samotnou hranici lidských možností.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Rozbor plavby

#### 2.1.1 Plavecký styl

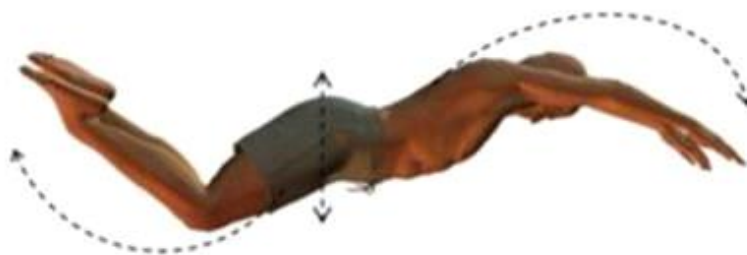
U závodních plavců se setkáváme se čtyřmi styly plavání: prsa, motýlek, znak a volný způsob neboli kraul.

Nejrychlejší a také nejčastěji používaný plavecký způsob pro sportovní plavání (triatlon, dlouhé tratě) je kraul (Obr. 1). Rychlost plavání je poměrně plynulá, nastává druhé nejmenší kolísání rychlosti po znaku. [2] Tělo je téměř v horizontální poloze, což umožňuje snížit odpor na minimum a usnadnit tak obtékání vody. [3]



*Obr. 1: Plavecký styl kraul [2]*

Druhý nejrychlejší a zároveň nejmladší plavecký způsob je motýlek (Obr. 2), který je odvozený od stylu prsa. [3] V průběhu plavání vykonává plavec vlnění, tudíž se poloha trupu vůči hladině během cyklu mění. Úhel mezi hladinou a podélnou osou těla je v rozmezí 10–30 stupňů. [2]



*Obr. 2: Plavecký styl motýlek [2]*

Další závodní plavecký způsob se nazývá znak (Obr. 3). Od zbylých stylů se výrazně liší polohou plavce, jenž plave na zádech. Tělo je téměř v horizontální poloze, ramena jsou mírně výše než boky. Úhel mezi hladinou a plavcem by se měl pohybovat mezi 5–10 stupni, kvůli optimálnímu poměru mezi nízkým odporem a využitím potenciálu záběru nohou. [3]



*Obr. 3: Plavecký styl znak [2]*

Nejpomalejší závodní plavecký styl jsou prsa. Vyznačují se největším kolísáním rychlosti během jednoho plaveckého cyklu a to v rozmezí 0–3,5 m/s. Neustálé zastavování a dostávání se do pohybu má za příčinu největší spotřebu energie ze všech plaveckých stylů. [2]

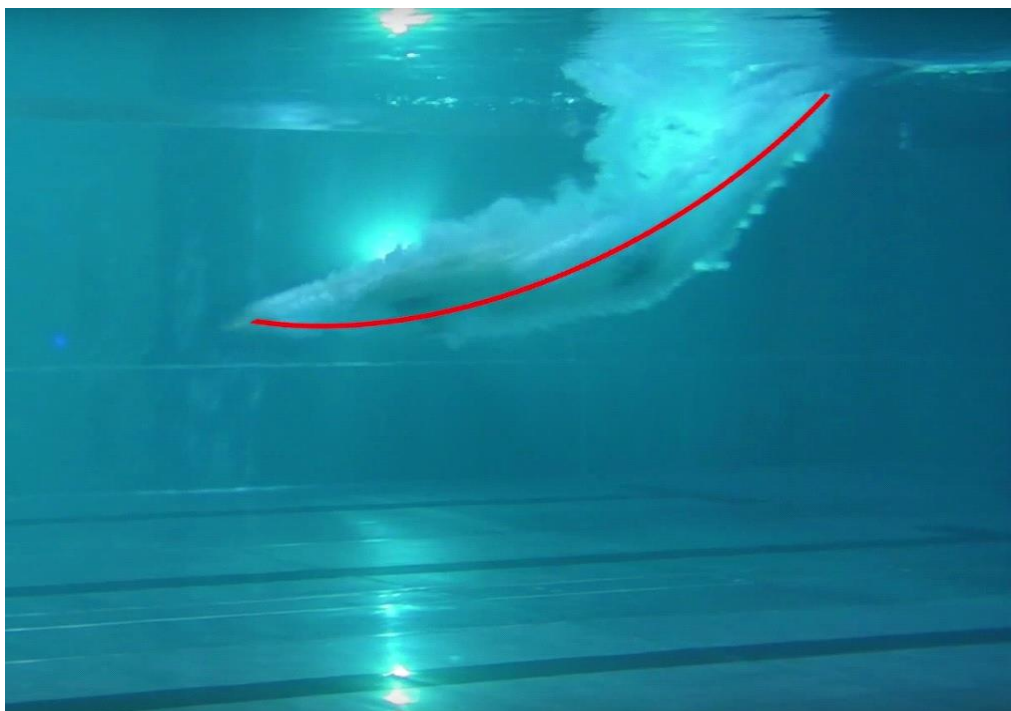


*Obr. 4: Plavecký styl prsa [2]*

Během všech stylů se trup plavce dostává pod hladinu, ovšem do největší hloubky se tělo dostává při startovním skoku a také při obrátce.

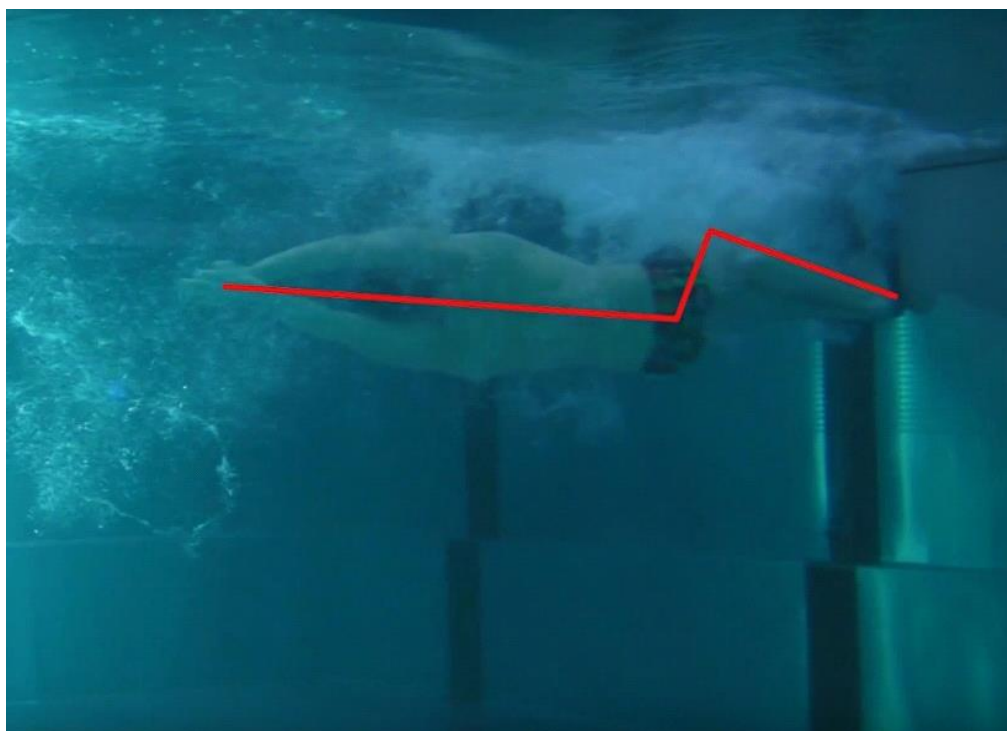
### **2.1.2 Startovní skok, obrátka**

Startovním skokem začíná plavecký závod všech stylů, kromě plaveckého stylu znak, který má start z vody. Rozlišují se 2 druhy skoku, klasický a atletický. [2] Zabývat se budu skokem klasickým (Obr. 5), při které se plavec dostává do větší hloubky, jelikož dopadá na hladinu pod větším úhlem, konkrétně 30–40 stupňů. Díky tomu narůstá podíl kinetické energie. Plavec se snaží o protnutí hladiny v jednom místě. Tělo zaujímá hydrodynamickou polohu, tudíž je tělo napnuté, paže vzpažené dovnitř, dlaň jedné ruky na hřbetu druhé, mezi pažemi sevřená hlava, nohy a chodidla napnuté. V době dopadu na hladinu je plavcova rychlost až čtyřikrát větší, než rychlost plavání. Vlivem odporu vody tato rychlost po zanoření klesá. Trajektorie pohybu v hydrodynamické poloze je díky setrvačnosti do hloubky přibližně 60–90 cm. V této hloubce se dráha mění z pohybu vpřed dolů na vpřed vzhůru. Při poklesu rychlosti setrvačného pohybu na rychlost plavání nasazuje plavec první záběrové pohyby. Při atletické variantě odrazu je trajektorie letu plošší, to platí i pro obloukovitou dráhu pod hladinou. Nedosahuje se tedy takové hloubky jako při klasickém způsobu. [4,5]



**Obr. 5:** *Klasická varianta startovního skoku [2]*

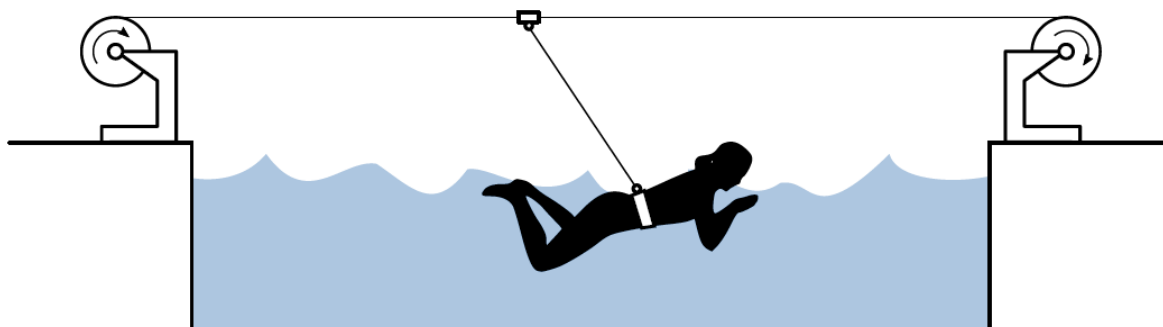
Při provádění obrátky (Obr. 6) se dostávají bedra, kde je plánované uchycení měřící jednotky, do hloubky necelého jednoho metru. Tudíž hloubka, kterou by mělo opláštění minimálně vydržet je 1 m pod vodní hladinou. Z důvodu vytvoření rezervy pro plavecké chyby nebo pro jedinečný styl je předpokládáno, že obal měřící jednotky vydrží tlak vody i v hloubce 1,5 m.



**Obr. 6:** *Obrátka [2]*

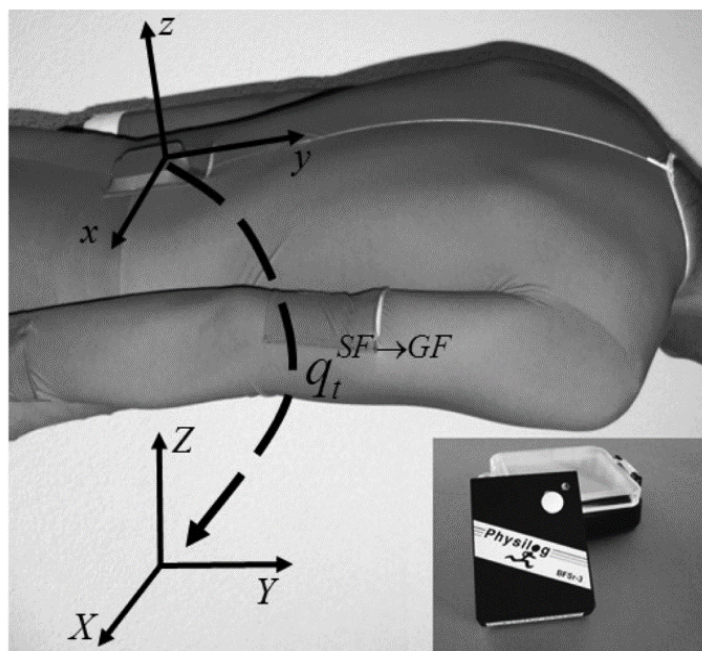
## 2.2 Měření pohybu závodního plavce

Otázka analýzy pohybu není žádnou novou inovací ani na VUT. Již delší dobu Centrum sportovních aktivit využívá pro měření rychlosti plavců systém zvaný tachograf (Obr. 7) v kombinaci se synchronním záznamem tří podvodních kamer. Principem tachografu je odvíjení lanka z bubnu, které za sebou vleče plavec. Podvodní kamery slouží pro vizuální analýzu plavecké techniky, jež je omezena některými faktory, např. odrazem světla nebo tvorbou bublin kolem plavcova těla. [6,7]



*Obr. 7: Návrh funkce tachografu [7]*

Měřením rychlosti a analýzou pohybu pomocí inerciální měřicí jednotky umístěné na plavci se zabývali švýcarští vědci v Lausanne v roce 2012. Měření bylo prováděno pomocí jednoho inerciálního senzoru Physilog s 3D akcelerometrem a 3D gyroskopem umístěným ve vodotěsné krabičce (Obr. 8). Senzor byl vložen do speciální kapsy na zádech plaveckého obleku zhotoveného na zakázku. I přes svůj nehydrodynamický hranatý tvar nezpůsobil Physilog plavcům zbytečně velký odpor díky svým malým rozměrům. Záznam dat se ukládá na paměťovou kartu, která se poté vloží do počítače z důvodu provedení analýzy. [8]



*Obr. 8: Inerciální senzor Physilog umístěný ve speciální kapse plaveckého obleku [8]*



## 2.3 Vodotěsné krabice

Pokud je zvolena tvorba vlastní inerciální měřicí jednotky, jedním z hlavních problémů je umístění elektroniky do dokonale vodotěsného obalu. Na trhu je nepřehledné množství vodotěsných krabic různých tvarů a rozměrů (Obr. 9). Tvar je převážně hranatý, tudíž se nevyznačuje přijatelným hydrodynamickým tvarem, který by zaručoval nízký odpor plavci. Kryty se skládají převážně ze dvou dílů. V jednom díle je do drážky vložená těsnící guma, druhý díl zapadá do drážky a tlačí na gumu, která se roztáhne a zaplní zbylý prostor drážky. Tímto je dosažena vodotěsnost u většiny dostupných boxů na trhu nebo také u vodotěsných krytů kamer GoPro. Uzavření těchto krabic je provedeno pomocí klipů nebo sešroubováním 2 dílů.



*Obr. 9: Vodotěsná krabička LOCK [9]*

## 2.4 Shrnutí

Závodní plavání má několik variant, ať už plavecký styl, tak délka trati. Pro maximální úsporu vynaložené energie nebo boje o cenné desetiny vteřiny je důležité mít dokonalou plaveckou techniku. K té nám mohou pomoci technologie snímání pohybu a rychlosti. Zaznamenávání pohybu na 3 podvodní kamery nám poskytne informace pouze o pohybech plavce, nikoliv o průběhu rychlosti. Tyto data dosud CESA získává ze zařízení zvané tachograf, které má ovšem několik negativ. Hlavním problémem je omezování plavce při pohybu. Měřit jde vždy pouze plavbu jedné délky bazénu. Plavec tedy nemůže například získávat data o průběhu otáčky. Z tohoto důvodu je zájem o měření rychlosti pomocí inerciální měřicí jednotky umístěné na plavce. Jednotka nebude během tréninku plavce omezovat a zároveň umožní delší ucelené sbírání dat. Touto problematikou se zabývali již ve Švýcarsku. Jejich způsob ovšem nesplňuje veškeré parametry zadání, například snadné upevnění na plavce. Využívali na míru šitého plaveckého obleku, který nemůže využívat více plavců. Proto je potřeba vymyslet nové měření pohybů závodních plavců, které bude moci využít široké spektrum plavců. Pro toto měření neexistuje na trhu přijatelný vodotěsný kryt měřicí jednotky, který by se vyznačoval hydrodynamickým tvarem.

### 3 FORMULACE PROBLÉMU A CÍLŮ

Je tedy potřeba navrhnout vodotěsné opláštění inerciální jednotky pro měření průběhu rychlosti závodních plavců s přihlédnutím na tyto požadavky:

- hydrodynamický tvar zaručující nízký odpor při plavání,
- jednoduchý způsob upevnění na plavce,
- snadný přístup k vnitřní elektronice,
- přístupné nabíjecí konektory,
- jednoduché zapínání sbírání dat.

Předpokládá se, že se měřicí jednotka bude pohybovat do hloubky maximálně 1,5 m pod hladinou vody, tudíž i v této hloubce musí být dokonale vodotěsná a držet si svůj původní tvar. Při tvorbě opláštění je brán zřetel na následnou výrobu, která bude probíhat 3D tiskem.

Daný návrh bude konzultován s vedoucím bakalářské práce doc. Ing. Jiřím Krejsou, Ph.D. a Ing. Tomášem Ripelem, odpovídající osobou za konstrukční návrh.

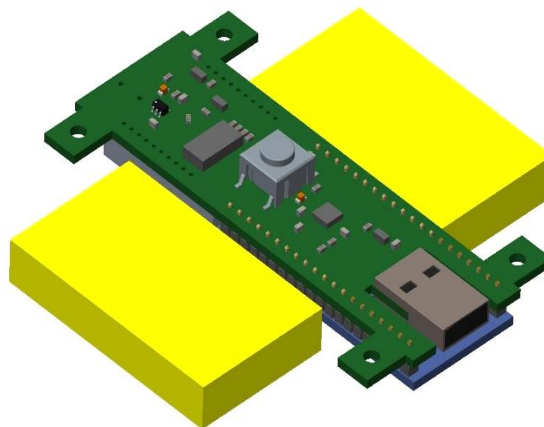
Ke tvorbě modelu bude použit konstrukční software CREO 2.0.

## 4 KONSTRUKČNÍ NÁVRH

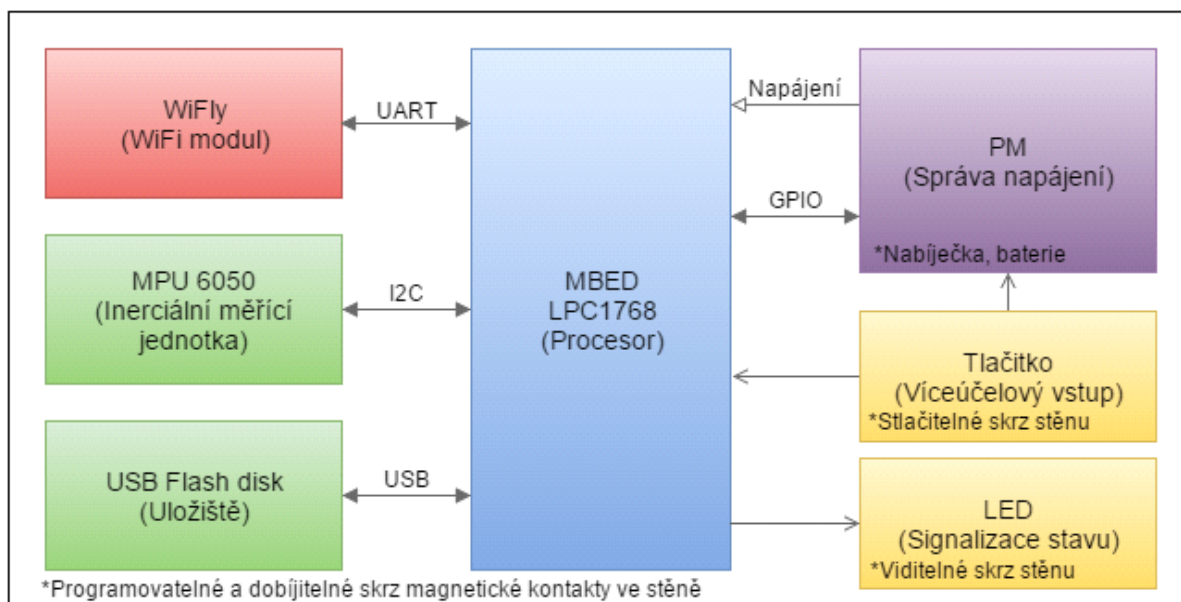
### 4.1 Elektronika

Vytvořil jsem návrh opláštění bezdrátové inerciální jednotky. Skládá se ze spodní a vrchní části, která jsou spojena šrouby. Uvnitř obalu je uzavřena elektronika (Obr. 10), kterou předložil Jakub Lešinský (Obr. 11). Jediná část přicházející do kontaktu s venkovním prostředím jsou nabíjecí konektory. Jedná se o procesor MBED, přichycený na desce plošných spojů tloušťky 1,6 mm. Tato deska slouží k mechanickému připevnění a elektrickému propojení jednotlivých elektronických součástek. [10] Zároveň je pomocí šroubů upevněná k opláštění. MBED a WiFi modul starající se o bezdrátový přenos naměřených dat jsou přichyceny ze spodní strany desky plošných spojů.

Další součást upevněná na spodní části je měřící čip obsahující akcelerometr a gyroskop zaznamenávající data ve třech osách. Na vrchní straně desky plošných spojů se nachází pouze spínač. K zapnutí tlačítka dochází promáčknutím horní stěny opláštění. Pro vizuální potvrzení sbírání dat prosvítá obalem LED dioda. USB Flash disk slouží pro zálohu informací o pohybu plavce v případě poruchy bezdrátového přenosu. Veškerá elektronika je napájena ze dvou baterií.



Obr. 10: Elektronika (3D pohled)



Obr. 11: Schéma elektroniky<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Schéma elektroniky dodal Jakub Lešinský



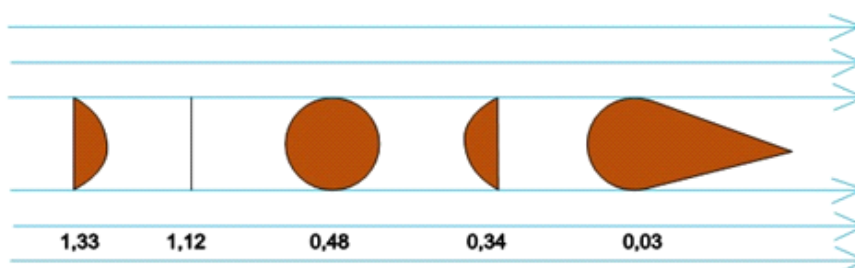
## 4.2 Konstrukční uzly

### 4.2.1 Tvar

Jak je již v zadání zmíněno, tvar opláštění musí splňovat požadavek na hydrodynamický tvar, kvůli nízkému odporu. Pokud by byla řešena inerciální jednotka jako samostatné těleso, byla by snaha dosáhnout nejnižšího součinitele odporu (Obr. 12). Tvar by tedy připomínal kapku vody. Pro odporovou sílu platí vztah:

$$F = \frac{1}{2} * C * \rho * S * v^2, \quad (4.2.1)$$

kde  $C$  je součinitel odporu pro daný tvar tělesa,  $\rho$  hustota tekutiny,  $S$  obsah průřezu kolmého ke směru pohybu a  $v$  relativní rychlost. [11,12]



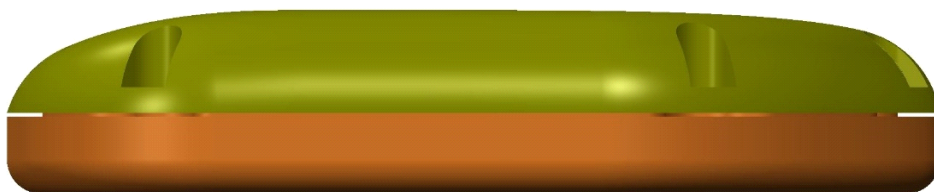
**Obr. 12:** Součinitel odporu pro různé tvary těles [13]

V tomto případě ovšem je brán průřez včetně plavce. Tudíž se pohled na odpor prostředí liší. Bylo provedeno snížení výšky na minimum, aby měřicí jednotka způsobovala plavci nejmenší přebytečný odpor tím, že bude vyčnívat. Zároveň rozložení elektroniky způsobí nárůst do šířky, který není možné z důvodu ergonomie pro plavce kompenzovat nárůstem do délky, jenž by umožnil vytvoření tvaru kapky při pohledu shora (Obr. 13) a dosažením optimálního odporu v rovině rovnoběžné s hladinou. Toto řešení by také přineslo větší množství vzduchu uzavřeného v obalu, který by negativně ovlivňovalo plavce pod vodou.



**Obr. 13:** Pohled shora

Při pohledu z boku (Obr. 14) je zřetelný rozdíl mezi vrchní a spodní částí. Zatímco u horní části byla snaha o hydrodynamický tvar, u spodní části to tak není z důvodu nadzvedávání přední části opláštění. Je vytvořen tedy jen malý rádius z důvodu pohodlí plavce, kterému by drhnutí hrany o kůži mohlo způsobovat podráždění či odření kůže. Toto opatření u spodního dílu opláštění má způsobovat přitlačný tlak na přední část a omezení proudění vody mezi plavcem a obalem měřicí jednotky, které způsobuje nadzvedávání předku opláštění.



**Obr. 14:** Pohled z boku

Při pohledu zepředu (Obr. 15) jsou boční hrany zaoblené, aby se zmenšil průřez měřicí jednotky. Musel být ovšem brán ohled na spojení spodní a vrchní části šrouby.



**Obr. 15:** Pohled zepředu

Výsledné rozměry jsou: délka 110 mm, šířka 100 mm a výška 21 mm. Tloušťka stěny je na většině míst 2 mm.

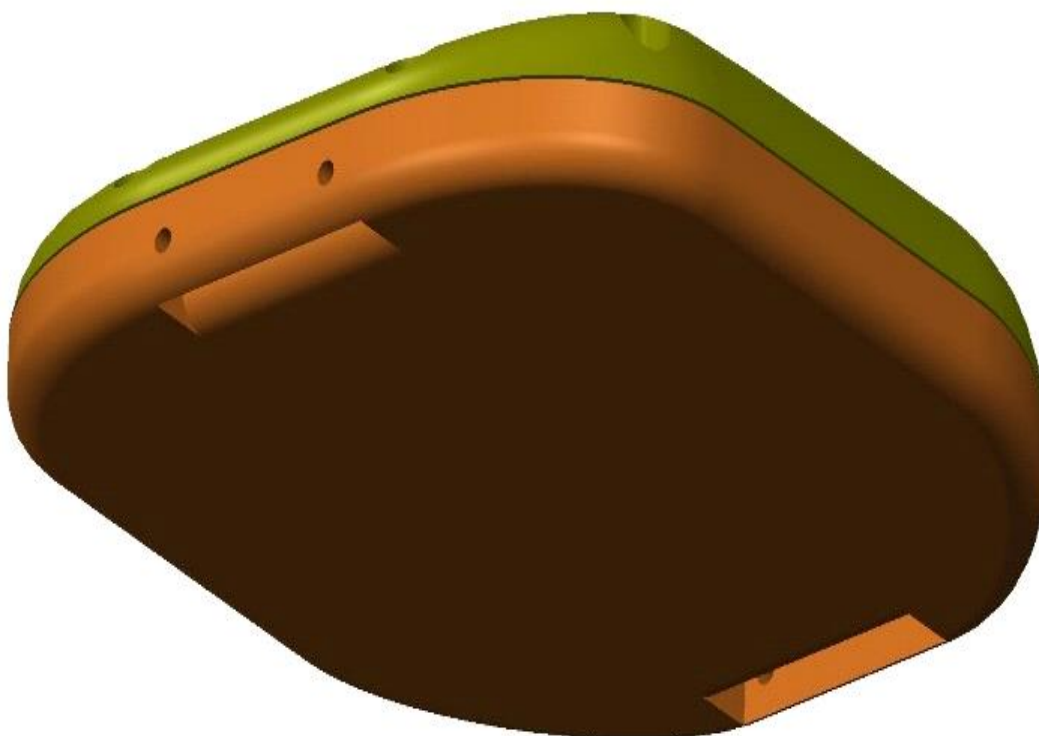
Během celého návrhu tvaru byl brán zřetel na vyrobiteľnost 3D tiskem. Tato metoda výroby byla zvolena z důvodů nejnižších výrobních nákladů při kusové výrobě prototypů.

#### 4.2.2 Uchycení

Inerciální měrná jednotka by měla být umístěna na bedrech plavce, případně trochu níže směrem k hýždím. Přichycení je provedeno pomocí gumového opasku s přezkou, využívaném při freedivingu neboli volném potápění. Rozměry pásku jsou šířka 50 mm a tloušťka 3 mm.

Byl proveden prvotní návrh, který předpokládal provlečení pásku přímo opláštěním. Ten se ukázal jako komplikovaný z důvodu šířky opasku, který se blížil polovině celkové délky obalu měřicí jednotky. Tento otvor na provlečení by bylo příliš složité vytvořit. Další nevýhodou by byly velké síly, které by plast, z něhož je obal vytisknut, musel vydržet.

Jako schůdnější varianta se ukázalo řešení (Obr. 16) s provlečeným páskem mezi měřicí jednotkou a tkaninou, která je natáhnuta ve směru pohybu plavce po spodní stěně mezi přední a zadní částí opláštění. Tato tkanina by byla na obou stranách uchycená ve speciálních otvorech (Obr. 17) pomocí trhacích nýtů ke konstrukci obalu.



*Obr. 16: Pohled na spodní stěnu, kudy povede tkanina na provlečení pásku*



*Obr. 17: Speciální otvor na uchycení tkaniny*

Pokud by se toto řešení ukázalo jako nestabilní a celá měřicí jednotka by se pohybovala po zádech plavce, byla by ušita k pásku neoprenová kapsa přesně na míru opláštění měřicí jednotky.

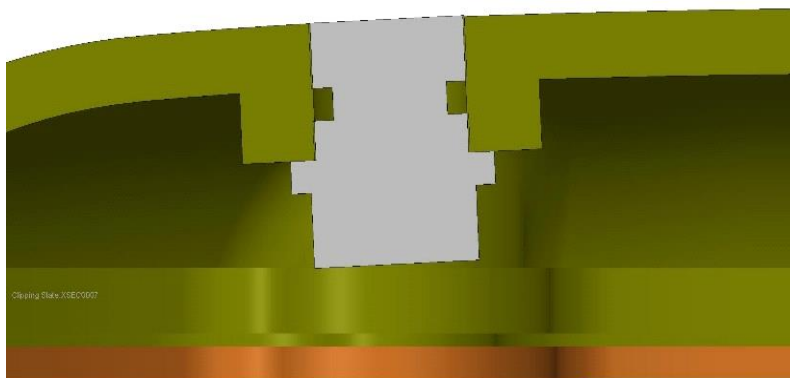
### 4.2.3 Nabíjení

Veškerá elektronika je napájena ze dvou dobíjecích baterií, umístěných po stranách na dně opláštění. Z důvodu nabíjení baterií bez nutnosti otevření obalu, jsou do horní stěny umístěné 4 nabíjecí konektory (Obr. 18). Nabíjení je prováděno pomocí 2 konektorů, zbylé 2 slouží pro případný přenos dat z flash disku. Tyto dvojice jsou do horní stěny umístěny odděleně pro snadnější rozlišení.



*Obr. 18: Rozložení nabíjecích konektorů ve vrchní stěně*

Nabíjecí konektor (Obr. 19) mírně vyčnívá z horní stěny pro snadnější kontakt s nabíjecím protikusem. Uložení kontaktů do díry obalu je s přesahem a montáží provedenou lisováním.

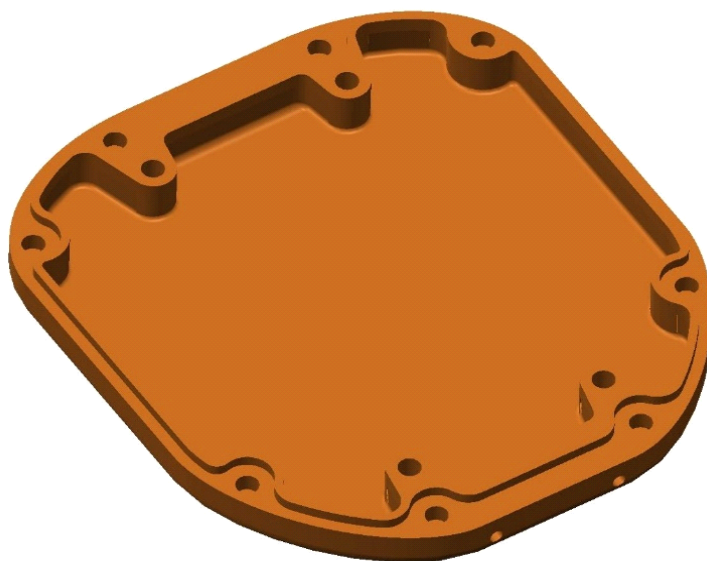


*Obr. 19: Uložení nabíjecího konektoru do vrchní stěny*

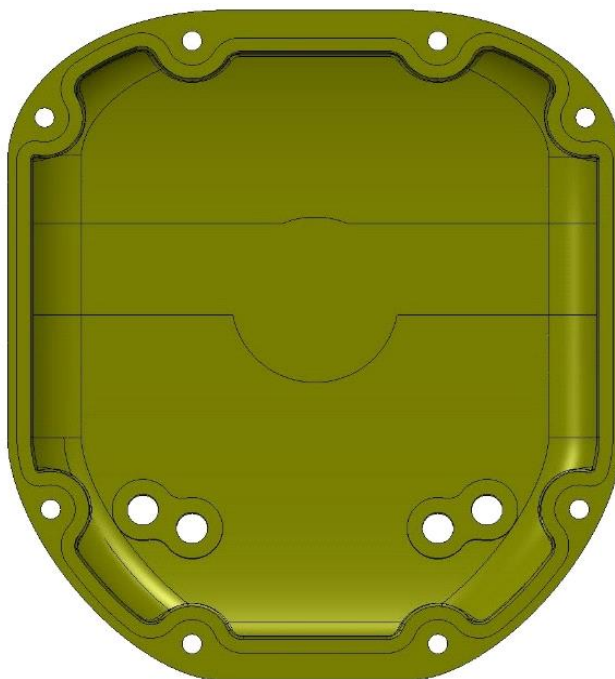
#### 4.2.4 Rozebíratelnost

Z důvodu snadného přístupu k elektronice bylo navrženo spojení vrchní (Obr. 21) a spodní části (Obr. 20) opláštění pomocí 8 inbusových šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem DIN 912, konkrétně M3x10. Do spodního dílce opláštění jsou zamýšleny mosazné závitové vložky do plastu, pro které jsou předpřipraveny díry už rovnou z tisku. Konkrétně vložky se závitem M3 od firmy SIMAF s označením 40/TR030H050.

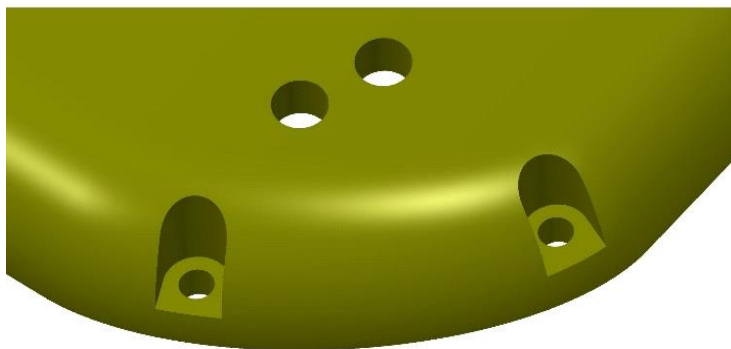
Rozložení šroubových spojů je provedeno tak, aby nebylo nutno zvětšovat rozměry obalu. V těchto místech spodního dílce je opláštění silnější z důvodu umístění závitových vložek. V horní části je přidán také materiál kvůli schování hlav šroubů v těle inerciální měřicí jednotky. Tyto otvory (Obr. 22) by mohly být zakryty pomocí zásepek pro lepší obtékání vody.



**Obr. 20:** Spodní část jednotky s předpřipravenými dírami pro závitové vložky



**Obr. 21:** Vrchní část jednotky – vnitřní část

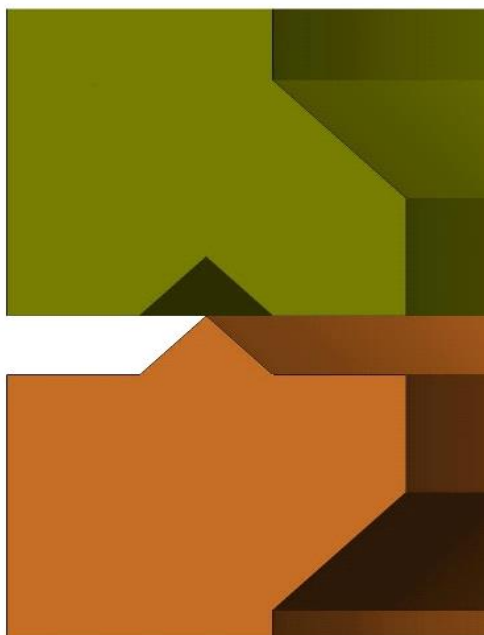


**Obr. 22:** *Otvory ve vrchní části jednotky pro hlavy šroubů*

#### 4.2.5 Těsnění

Základní roli při návrhu hrálo zaručení vodotěsnosti. Při návrhu opláštění skládajícího se ze spodní a vrchní části, byla největší pozornost věnována utěsnění styku těchto dvou dílců. V této dělicí rovině bude vedeno gumové těsnění o tloušťce 0,4 mm, které bude sevřeno obalem. Z důvodu těsnosti bude ohnuto přes hranu 90 °.

Toto řešení bylo prvotně řešeno „V vrubem“. (Obr. 23) Naskytly se ovšem obavy, zda toto řešení bude dokonale těsné i v místě odpovídající zhruba polovině délky opláštění. Tato oblast je nejdále vzdálena od šroubů přitlačujících horní díl. Mohlo by zde tudíž dojít k prohnutí plastové konstrukce obalu a vytvoření mezery mezi spodní a vrchní částí.



**Obr. 23:** *Sevření gumového těsnění „V vrubem“*

Jako jistější se zdála varianta „schodu“ (Obr. 24). Vrchní díl se nasune na spodní a dojde k ohnutí těsnění přes 2 hrany. Zde je vytvořená vůle 0,4 mm, aby se guma do tohoto prostoru vměstnala, ale zároveň byla stlačena.

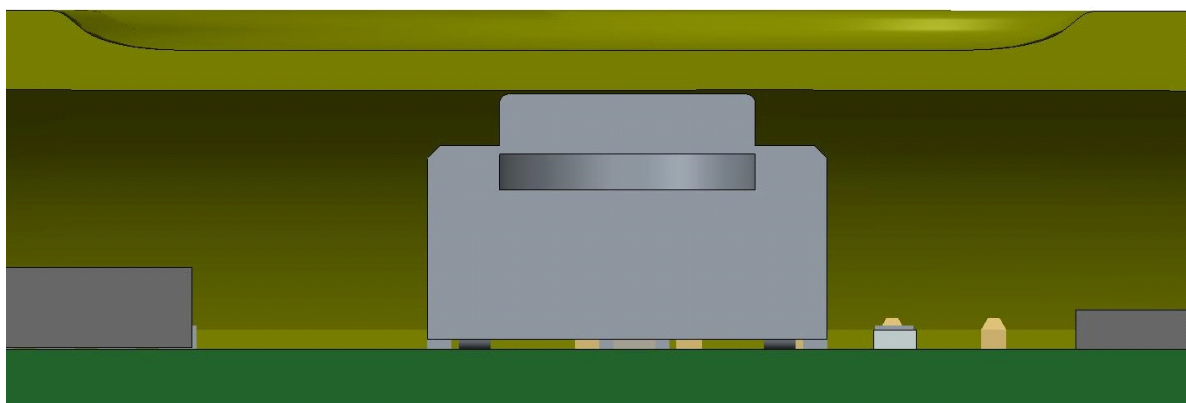


**Obr. 24:** *Varianta „schodu“*

Dalším nebezpečným místem jsou nabíjecí kontakty, které mají být nalisovány. Tyto kontakty je potřeba utěsnit silikonovým lepidlem.

#### **4.2.6 Zapínání / vypínání**

Pro účel zapnutí měření a následného vypnutí je na vrchní straně desky plošných spojů umístěné tlačítko. K signalizaci sepnutého stavu slouží LED dioda. Ke stlačení tlačítka dochází zatlačením na vrchní část opláštění, kde byla za účelem většího a snadnějšího průhybu provedeno vybrání (Obr. 25) o průměru 25 mm. V tomto místě má obal tloušťku 1 mm.



**Obr. 25:** *Vybrání ve vrchní stěně pro snadnější stlačení zapínacího tlačítka*



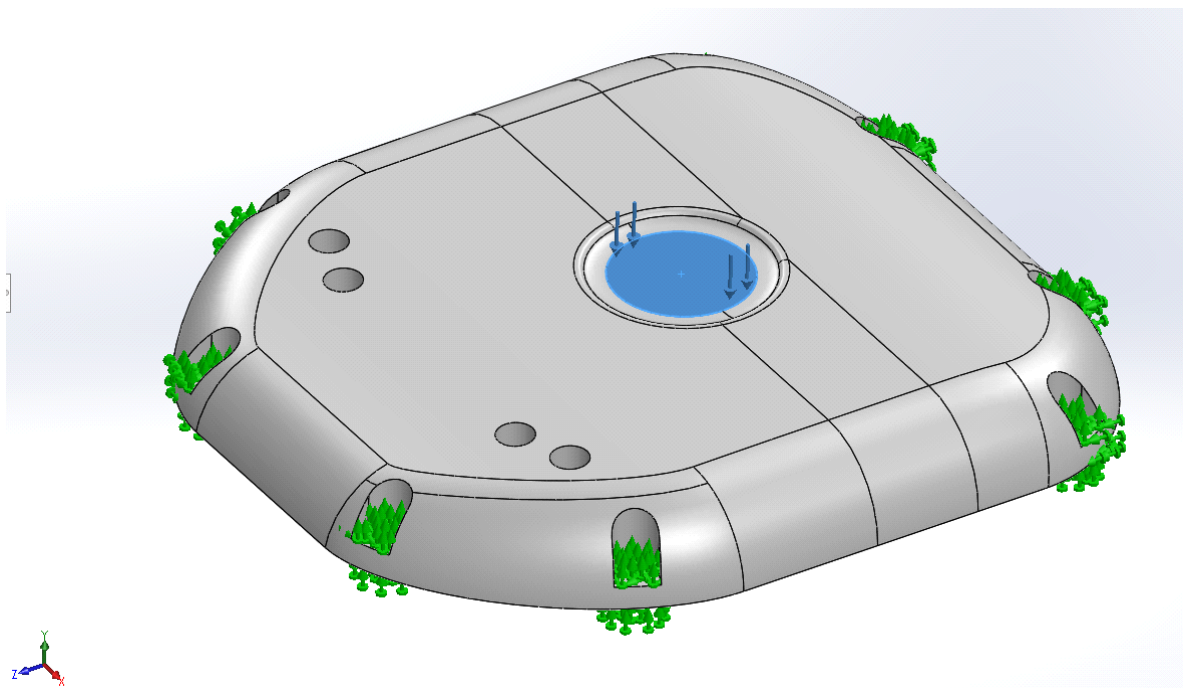
### 4.3 Napět'ová a deformační analýza <sup>2</sup>

Byla provedena zjednodušená napět'ová a deformační analýza pro případ stlačení tlačítka. Jedná se pouze o odhad, jelikož 3D tištěné dílce není možné takto analyzovat. Byly zvoleny materiálové charakteristiky pro homogenní ABS plast (Tabulka 1).

*Tabulka 1: Materiálové charakteristiky pro ABS plast*

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Modul pružnosti	2	GPa
Poissonův poměr	0,394	-
Modul pružnosti ve smyku	318,9	MPa
Hustota	1020	Kg/m <sup>3</sup>
Pevnost v tahu	30	MPa

Síla působící na oblast vybrání je zvolena 20 N, uchycení je zvoleno v místech šroubových spojů (Obr. 26).

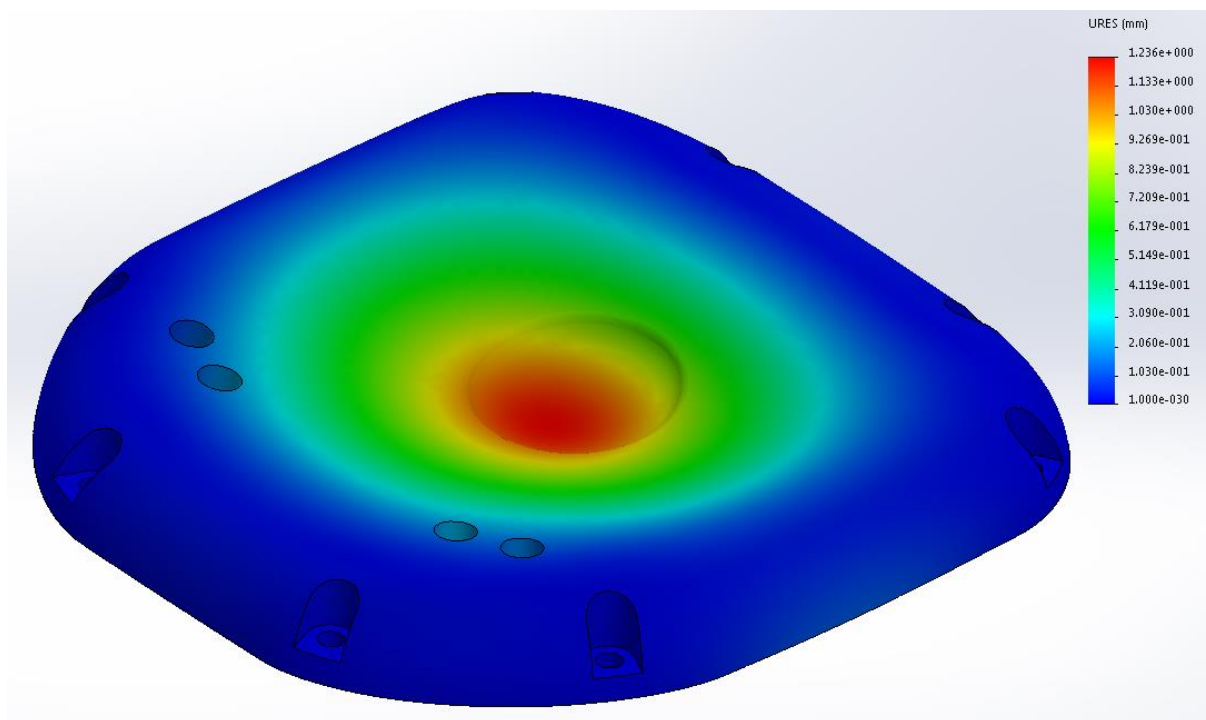


**Obr. 26:** Zatížení a uchycení vrchního dílu jednotky

Z odhadu deformační analýzy (Obr. 27) vyplývá, že dojde k maximálnímu promáčknutí 1,2 mm. Tento průhyb je dostatečný pro sepnutí a spuštění snímání dat.

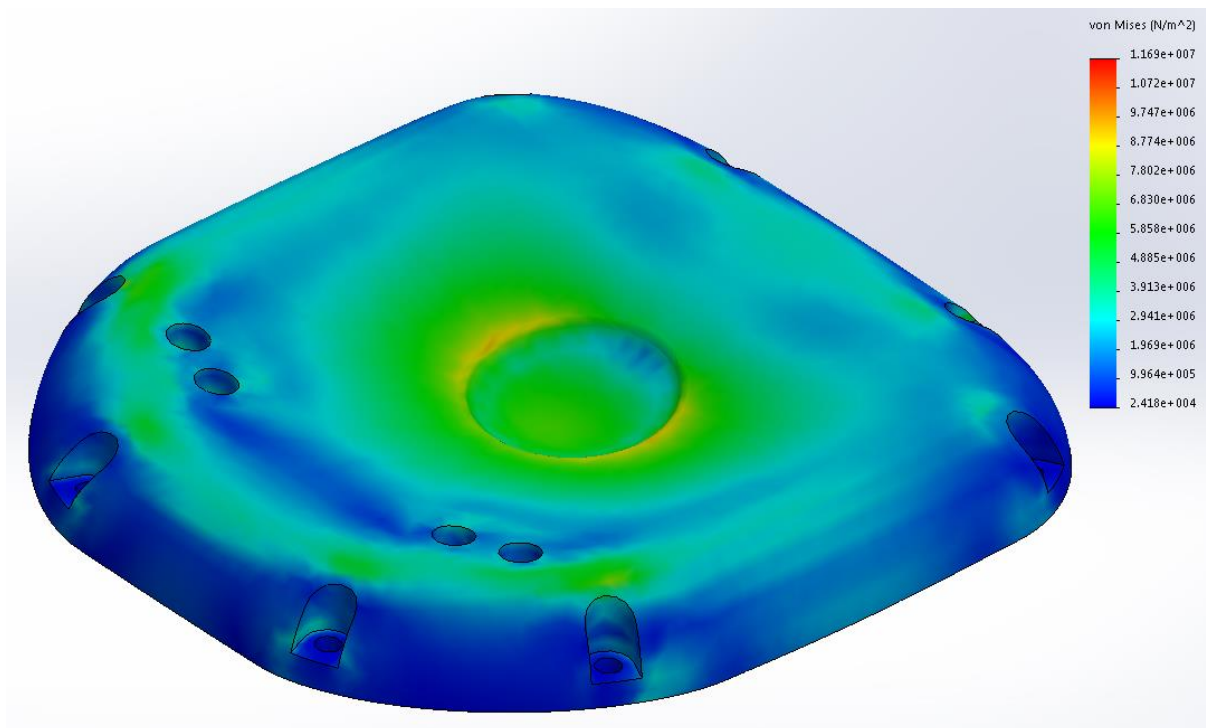
<sup>2</sup> Deformační a napět'ovou analýzu vytvořil a dodal Ing. Tomáš Ripel.





*Obr. 27: Deformační analýza*

Napěťová analýza (Obr. 28) ilustruje napětí v horní části opláštění při zatlačení 20 N na vybrání, které slouží ke snadnějšímu zmáčknutí tlačítka. Největší napětí je v oblasti okolo vybrání, kde je přechod mezi stěnou a vybráním pomocí malého radiusu (R2). Ten působí jako koncentrátor napětí. Maximální napětí zjištěné analýzou je konkrétně 11,7 MPa.



*Obr. 28: Napěťová analýza*

## 5 VÝROBA A MONTÁŽ

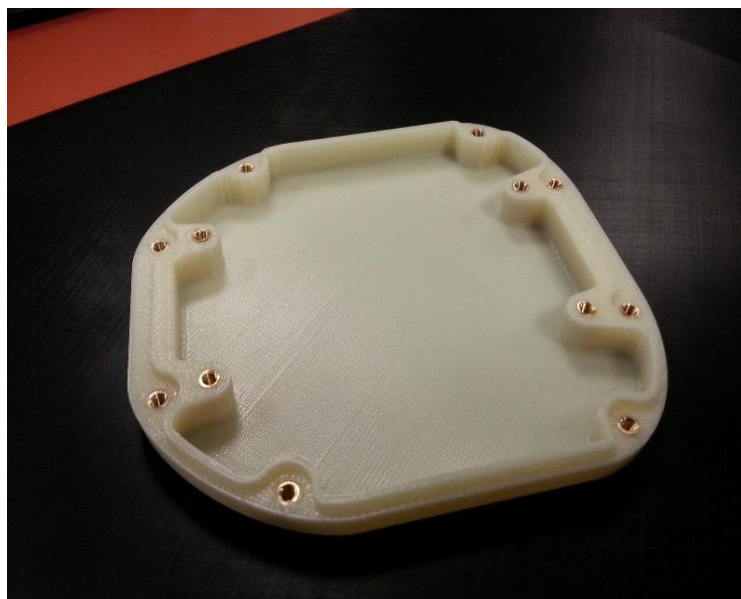
Opláštění bylo vyrobeno metodou 3D tisku dne 24. 3. 2016 v laboratoři Ústavu automobilního a dopravního inženýrství fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Byla použita 3D tiskárna DIMENSION uPRINT (Obr. 29).



*Obr. 29: 3D tiskárna DIMENSION uPRINT [14]*

Do vytištěného opláštění byly nalisovány mosazné závitové vložky (Obr. 30). Vyřezalo se těsnění ze silikonové fólie na pečení o tloušťce 0,4 mm, které po smontování spodní a vrchní části pomocí šroubů s vnitřním šestihranem a válcovou hlavou rozdělilo obal na horní a dolní prostor v dělicí rovině. Díky tomu bylo možné detekovat propustnost obou částí nezávisle na sobě.

Magnetické kontakty byly kladívkem jemně nainstalovány do připravených otvorů ve vrchní stěně. Do drážky v kontaktech bylo vloženo silikonové lepidlo.



*Obr. 30: Nalisované mosazné závitové vložky do vytištěné spodní části opláštění*

## 6 OVĚŘENÍ

Po sestavení obalu byl proveden první test těsnosti, který spočíval v ponoření opláštění do dřezu s vodou, provádění rychlých pohybů a stlačování stěn po dobu přibližně 30 vteřin. Test dopadl negativně, k protečení došlo přímo skrz stěny.

Z toho důvodu byly všechny stěny z vnitřní i vnější strany opláštění napuštěny disperzním lepidlem Dispercoll D2. Druhý test byl proveden po 24 hodinovém schnutí. Opět bylo torzo jednotky ponořeno, tentokrát do kbelíku s vodou, a prováděly se po dobu 3 minut rychlé pohyby. Zkouška byla pozitivní, oba indikační papírky zůstaly zcela suché. Došlo ovšem ke smytí vrstvy lepidla z vnějšího povrchu obalu, které vodu obarvilo na mléčnou barvu. Toto je pro použití v bazénu nepřijatelné.

Bylo tedy provedeno naleptání opláštění acetonem, aby nedošlo k vymývání disperzního lepidla. Aceton byl štětcem rovnoměrně nanesen na celou vnější plochu obalu inerciální měřicí jednotky. Tímto krokem se ztratila jemná struktura tisku a povrch získal lesklý vzhled.

Následně se provedl test těsnosti v bazénu, jehož výsledek byl negativní. Při plavání 2 x 50 m prsa s opláštěním v ruce zateklo v dolní části. Nebylo zjištěno, zda se voda dostala skrz těsnění nebo skrz stěnu u okraje. Při potopení do 4 metrů na 30 vteřin došlo k masivnímu zatečení. Zjistilo se ovšem, že magnetické kontakty jsou zcela jistě těsné.

Opláštění bylo nastříkanou tekutou gumou ve spreji z vnitřní i vnější strany (Obr. 31). Následně byl proveden další test v bazénu, kde se zjistilo, že během přeplavání 15 bazénů byl obal inerciální měřicí jednotky dokonale těsný. Tato zkouška byla provedena 2x se stejným pozitivním výsledkem.



**Obr. 31:** *Nastříkané opláštění tekutou gumou ve spreji*

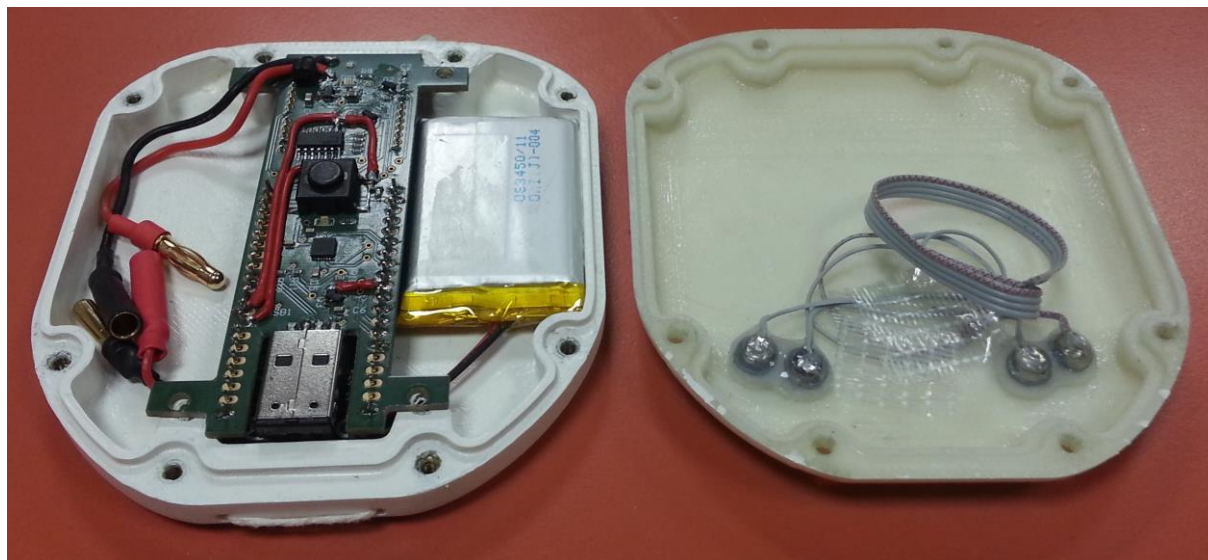
Testování prázdného obalu nebylo zcela autentické. Objem vzduchu uvnitř opláštění vybaveného elektronikou bude ve skutečnosti mnohem menší. K dalšímu snížení objemu vzduchu by bylo vhodné vyplnění prostoru kolem elektroniky homogenním materiálem.

Po úspěšném testu vodotěsnosti byla osazena elektronika (Obr. 32). Deska plošných spojů nesoucí veškerou elektroniku kromě baterií se ke spodní části upevnila pomocí 4 šroubů.

Bylo provedena zkouška již vybavené jednotky (Obr. 33) s pozitivním výsledkem. Inerciální měřicí jednotka zaznamenávala data pohybu plavce, vodotěsnost byla také dodržena.



Upevnění na plavce bylo provedeno pomocí pásky. Tkanina, kterou se má provlékat pásek, ještě nebyla připevněná pomocí nýtů a byla provizorně nahrazena provázkem. Ten se provlekl právě otvory připravenými pro nýtování. Měřicí jednotka na zádech držela dobře, nepohybovala se žádným směrem.



*Obr. 32: Osazení elektroniky*



*Obr. 33: Inerciální měřicí jednotka testovaná na plavci*

## 7 ZÁVĚR

Začátek práce obsahuje popis plaveckých stylů včetně startovního skoku a obrátky. Dále popisuje způsoby měření pohybu závodních plavců a ohlédnutí na trh, který pro náš účel nepřináší vhodný vodotěsný obal.

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout vodotěsné opláštění inerciální jednotky, které bude zaručovat nízký odpor při plavání díky hydrodynamickému tvaru. Další podmínkou byl snadný přístup k vnitřní elektronice a přístupné nabíjecí konektory. V neposlední řadě bylo nutné zajistit jednoduchý způsob upevnění na plavce.

Byl vytvořen model opláštění, který se potýkal s následujícími konstrukčními uzly. Vytvoření optimálního tvaru, uchycení na plavce, nabíjení, snadnou rozebíratelností, vytvořením spolehlivého těsnění a jednoduchým zapínáním měření. Poté bylo opláštění vyrobeno metodou 3D tisku.

Po montáži byla provedena série testů vodotěsnosti. Bylo zjištěno, že metoda 3D tisku není ideální pro výrobu vodotěsných dílů, jelikož dochází k protečení přímo skrz stěny. Z tohoto důvodu byly provedeny úpravy povrchu pomocí disperzního lepidla, acetonu a tekuté gumy ve spreji. Poté byl obal inerciální měřicí jednotky dokonale vodotěsný.

Byla provedena zkouška s již zabudovanou elektronikou, která dopadla úspěšně. Všechny kritéria zadání byly tedy splněny.

Jelikož se jednalo o první návrh opláštění, byly zaznamenané modifikace pro další vyráběný kus. Jedná se o výztuhy obalu a vyplnění slepých prostor, které sebou ovšem přinesou vyšší finanční nákladnost. Dále vytvoření jednoduššího tvaru lemu těsnění a vložení závitových vložek ze spodní strany opláštění, aby se montáží zatlačovaly do díry a nedocházelo k jejich vytrhávání. Modifikaci celého tvaru přináší poznatek, že pro napájení elektroniky postačí pouze jedna baterie.

## 8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BENEŠ, Michal. *Inovativní technologie v plavání*. Brno, 2010. Bakalářská práce. MASARYKOVA UNIVERZITA, Fakulta sportovních studií, Katedra atletiky, plavání a sportů v přírodě. Vedoucí práce PaedDr. Miloš Lukášek, Ph.D.
- [2] Teorie a didaktika plavání: Plavání. *Masaryk University: Faculty of Sports Studies* [online]. Brno: Faculty of Sports Studies, Masaryk University, 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.fsps.muni.cz/inovace-SEBS-ASEBS/elearning/didaktika-plavani/plavani>
- [3] Plavecké styly. *Plavecké styly: webové stránky paní Z.* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.plaveckestyly.funsite.cz/>
- [4] ČECHOVSKÁ, Irena (ed.). *Problematika plavání a plaveckých sportů: Díl 3*. Praha: Karolinum, 2003. ISBN 80-246-0637-2.
- [5] Elektronická studovna: Dokumenty: LEKCE\_c.\_21.doc. *Fakulta tělesné výchovy: Univerzita Karlova* [online]. Praha: Fakulta tělesné výchovy, 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [web.ftvs.cuni.cz/elstudovna/download.php?dir=./obsah/plavjedna/doc&soubor=LEKCE\\_c.\\_21.doc](http://web.ftvs.cuni.cz/elstudovna/download.php?dir=./obsah/plavjedna/doc&soubor=LEKCE_c._21.doc)
- [6] DADASHI, Farzin, Gregoire MILLET a Kamiar AMINIAN. Inertial measurement unit and biomechanical analysis of swimming: An update. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie* [online]. 2013, **61**(3), 28-33 [cit. 2016-05-23]. ISSN 1422-0644. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/258696668\\_Inertial\\_measurement\\_unit\\_and\\_biomechanical\\_analysis\\_of\\_swimming\\_An\\_update](https://www.researchgate.net/publication/258696668_Inertial_measurement_unit_and_biomechanical_analysis_of_swimming_An_update)
- [7] KUMPÁN, Pavel. *Jednotka pro analýzu pohybu závodních plavců*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.
- [8] DADASHI, Farzin, Florent CRETENAND, Grégoire P. MILLET a Kamiar AMINIAN. Front-Crawl Instantaneous Velocity Estimation Using a Wearable Inertial Measurement Unit. *Sensors* [online]. 2012, **12**(10), 12927-12939 [cit. 2016-05-16]. DOI: 10.3390/s121012927. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/10/12927/>
- [9] Krabíčka LOCK, objem 550ML. CWG-shop: Nejlevnější výrobce CWG a MWG v ČR [online]. Litoměřice: LEAL.CZ s.r.o. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://cwg-shop.cz/schranky/56-krabicka-550ml-stredni.html>
- [10] Plošný spoj. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Plo%C5%A1n%C3%BD\\_spoj](https://cs.wikipedia.org/wiki/Plo%C5%A1n%C3%BD_spoj)
- [11] Hydrodynamika. *Neoficiální internetové fakultě všeho možného* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://radek.jandora.sweb.cz/f06.htm>

- [12] Mechanika tekutin: Odpor prostředí. *Univerzita Karlova v Praze: Matematicko-fyzikální fakulta* [online]. Praha: Matematicko-fyzikální fakulta UK, 2013 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/kontinuum/4\\_6](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/4_6)
- [13] Obtékání těles reálnou tekutinou. *ELUC: Elektronická učebnice* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1688>
- [14] UPrint SE Professional Powerhouse. Stratasys: 3D printing solutions [online]. Stratasys Ltd., 2016 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/idea-series/uprint-se#content-slider-1>

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

°		stupeň
3D		tří-dimenzionální
ABS		akrylonitrilbutadienstyren
$C$	[-]	součinitel odporu
CAD		počítačem podporované kreslení ( <i>computer-aided drafting</i> )
CESA		Centrum sportovních aktivit
cm		centimetr
$F$	[N]	síla
IMU		inerciální měřicí jednotka ( <i>inertial measurement unit</i> )
IRC		rotační snímač otáček
LED		dioda produkující světlo ( <i>light emitting diode</i> )
m		metr
mm		milimetr
MPa		megapascal
N		newton
$S$	[m <sup>2</sup> ]	obsah
USB		univerzální sériová sběrnice ( <i>universal serial bus</i> )
$v$	[m/s]	relativní rychlost
VUT		Vysoké učení technické
WiFi		bezdrátová síť ( <i>wireless fidelity</i> )
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota



## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Plavecký styl kraul [2] .....	10
Obr. 2: Plavecký styl motýlek [2] .....	10
Obr. 3: Plavecký styl znak [2] .....	11
Obr. 4: Plavecký styl prsa [2] .....	11
Obr. 5: Klasická varianta startovního skoku [2] .....	12
Obr. 6: Obrátka [2] .....	12
Obr. 7: Náčrtek funkce tachografu [7] .....	13
Obr. 8: Inerciální senzor Physilog umístěný ve speciální kapse plaveckého obleku [8] .....	13
Obr. 9: Vodotěsná krabička LOCK [9] .....	14
Obr. 10: Elektronika (3D pohled) .....	16
Obr. 11: Schéma elektroniky .....	16
Obr. 12: Součinitel odporu pro různé tvary těles [12] .....	17
Obr. 13: Pohled shora .....	17
Obr. 14: Pohled z boku .....	18
Obr. 15: Pohled zepředu .....	18
Obr. 16: Pohled na spodní stěnu, kudy povede tkanina na provlečení pásu .....	19
Obr. 17: Speciální otvor na uchycení tkaniny .....	19
Obr. 18: Rozložení nabíjecích konektorů ve vrchní stěně .....	20
Obr. 19: Uložení nabíjecího konektoru do vrchní stěny .....	20
Obr. 20: Spodní část jednotky s předpřipravenými dírami pro závitové vložky .....	21
Obr. 21: Vrchní část jednotky – vnitřní část .....	21
Obr. 22: Otvory ve vrchní části jednotky pro hlavy šroubů .....	22
Obr. 23: Sevření gumového těsnění „V vrubem“ .....	22
Obr. 24: Varianta „schodu“ .....	23
Obr. 25: Vybrání ve vrchní stěně pro snadnější stlačení zapínacího tlačítka .....	23
Obr. 26: Zatížení a uchycení vrchního dílu jednotky .....	24
Obr. 27: Deformační analýza .....	25
Obr. 28: Napěťová analýza .....	25
Obr. 29: 3D tiskárna DIMENSION uPRINT [13] .....	26
Obr. 30: Nalisované mosazné závitové vložky do vytištěné spodní části opláštění .....	26
Obr. 31: Nastříkané opláštění tekutou gumou ve spreji .....	27
Obr. 32: Osazení elektroniky .....	28
Obr. 33: Inerciální měřicí jednotka testovaná na plavci .....	28

## 11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Materiálové charakteristiky pro ABS plast .....	24
--	----